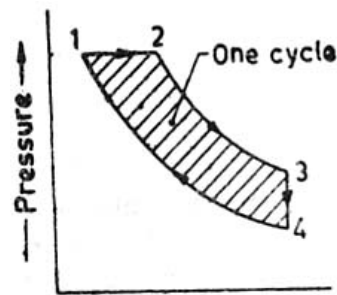


BAB VI

SIKLUS UDARA TERMODINAMIKA

Siklus termodinamika terdiri dari urutan operasi/proses termodinamika, yang berlangsung dengan urutan tertentu, dan kondisi awal diulangi pada akhir proses. Jika operasi atau proses dilukiskan pada diagram $p-v$, akan membentuk lintasan tertutup. Karena daerah dibawah setiap kurva merupakan kerja yang dilakukan, sehingga kerja netto dalam satu siklus diberikan oleh daerah yang ditutupi oleh lintasan, seperti ditunjukkan oleh gambar 1.



Gambar 1. Sebuah siklus termodinamika.

Pengetahuan mengenai siklus termodinamika adalah penting di dalam sistem pembangkit tenaga (seperti mesin bensin, diesel, turbin gas, dll). Mesin-mesin ini menggunakan campuran bahan bakar dan udara untuk operasinya. Karena massa bahan bakar yang digunakan sangat kecil bila dibandingkan dengan massa udara, sehingga campuran diasumsikan mengikuti sifat-sifat gas sempurna.

Catatan: Jika udara diasumsikan sebagai zat kerja di dalam silinder mesin, siklus disebut *siklus udara*.

Asumsi-asumsi pada siklus termodinamika

Analisis pada semua siklus termodinamika (atau siklus udara) didasarkan atas asumsi-asumsi:

1. Gas di dalam silinder mesin adalah gas sempurna, yaitu mengikuti hukum gas dan kalor spesifik konstan.
2. Konstanta fisika gas di dalam silinder mesin adalah sama dengan udara pada temperatur biasa.

3. Semua proses kompresi dan ekspansi adalah adiabatik, dan terjadi tanpa adanya gesekan internal.
4. Panas diberikan dengan adanya kontak antara gas panas dengan silinder pada tempat tertentu selama proses. Dengan cara yang sama panas dibuang dengan adanya kontak antara gas dingin dengan silinder pada tempat tertentu.
5. Siklus dianggap tertutup, dan udara yang sama digunakan kembali untuk mengulangi siklus.
6. Tidak ada reaksi kimia terjadi di dalam silinder mesin.

Klasifikasi Siklus Termodinamika

Siklus termodinamika, secara umum, bisa diklasifikasikan kedalam dua tipe:

1. Siklus reversibel,
2. Siklus irreversibel.

Siklus Reversibel

Sebuah proses, dimana perubahan dalam arah sebaliknya, akan membalik proses seutuhnya, dikenal dengan *proses reversibel*. Sebagai contoh, jika selama proses termodinamika dari keadaan 1 ke 2, kerja yang dilakukan oleh gas adalah W_{1-2} , dan kalor yang diserap adalah Q_{1-2} . Sekarang jika kerja dilakukan pada gas sebesar W_{1-2} dan mengeluarkan kalor sebesar Q_{1-2} , kita akan membawa sistem kembali dari keadaan 2 ke 1, proses disebut reversibel.

Pada proses reversibel, seharusnya tidak ada kerugian panas karena gesekan, radiasi atau konduksi, dsb. Siklus akan reversibel jika semua proses yang membentuk siklus adalah reversibel. Maka pada siklus reversibel, kondisi awal dicapai kembali pada akhir siklus.

Siklus Ireversibel

Sebagaimana telah disebut di atas bahwa jika perubahan dalam arah sebaliknya, akan membalik proses seutuhnya disebut sebagai proses reversibel. Tetapi jika perubahan tidak membalik proses, maka disebut *proses ireversibel*. Pada proses ireversibel, terjadi kerugian panas karena gesekan, radiasi atau konduksi.

Dalam keadaan di lapangan, sebagai besar proses adalah ireversibel. Penyebab utama ireversibel adalah : (1) gesekan mekanik dan fluida, (2) ekspansi tak tertahan, (3) perpindahan panas dengan perbedaan temperatur tertentu. Lebih jauh, gesekan akan merubah kerja mekanik menjadi panas. Panas ini tidak bisa dirubah kembali dalam jumlah yang sama ke dalam kerja mekanik. Sehingga jika ada gesekan di dalam proses maka proses adalah ireversibel. Sebuah siklus adalah ireversibel jika ada proses ireversibel pada proses-proses pada siklus tersebut. Maka pada siklus ireversibel, kondisi awal tidak didapati pada akhir siklus.

Reversibilitas Proses Termodinamika

1. Isothermal dan Adiabatik

Perlu dicatat bahwa proses atau siklus penuh adalah hal yang ideal. Dalam keadaan sebenarnya, operasi isothermal atau adiabatik lengkap tidak dicapai. Namun demikian keadaan ini bisa diperkirakan. Alasan dari hal tersebut adalah tidak mungkin mentransfer kalor pada temperatur konstan pada operasi isothermal. Lebih jauh, adalah tidak mungkin membuat silinder non-konduksi pada proses adiabatik. Pada keadaan sebenarnya, proses isothermal bisa dicapai jika proses begitu lambat sehingga kalor yang diserap atau dilepaskan pada laju dimana temperatur tetap konstan. Dengan cara yang sama, proses adiabatik bisa dicapai jika proses terjadi dengan sangat cepat sehingga tidak ada waktu bagi kalor untuk masuk atau meninggalkan gas.

Dengan pandangan tersebut, proses isothermal dan adiabatik dianggap sebagai proses reversibel.

2. Volume konstan, tekanan konstan dan pV^n konstan

Kita tahu bahwa temperatur benda panas, yang memberikan panas, tetap konstan selama proses, temperatur zat kerja akan bervariasi ketika proses berlangsung. Dalam pandangan ini, ketiga operasi di atas adalah ireversibel. Tetapi hal ini bisa dibuat mendekati reversibilitas dengan memanipulasi temperatur benda panas bervariasi sehingga pada setiap tingkatan temperatur zat kerja tetap konstan.

Dalam hal ini, proses volume konstan, tekanan konstan dan pV^n konstan dianggap sebagai proses reversibel.

3. Throttling

Proses ini adalah ireversibel, karena selalu ada kerugian kalor karena gesekan ketika zat kerja melewati orifis yang sempit.

Hubungan antara Siklus dan Mesin

Dalam pelajaran teori mesin kalor, diasumsikan bahwa fluida kerja digunakan berulang-ulang di dalam silinder. Kita sebut bahwa fluida melakukan satu siklus ketika fluida tersebut melalui berbagai proses yang berbeda dan kembali ke keadaan awal.

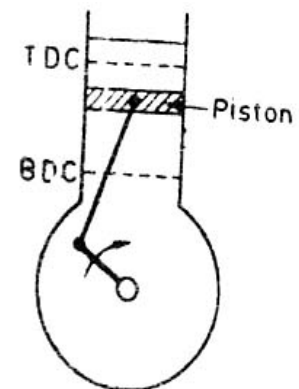
Namun fluida kerja pada mesin sebenarnya tidak mengalami siklus penuh, dan beroperasi pada siklus terbuka. Tetapi untuk kesederhaan analisis, kita mempelajarinya sebagai sebuah siklus tertutup (siklus ideal), dimana mendekati keadaan siklus terbuka.

Kerja Mesin Ideal

Mesin ideal bisa didefinisikan sebagai suatu peralatan yang menghasilkan kerja (yaitu tenaga) secara kontinu dengan bantuan fluida kerja, dimana fluida kerja mengalami proses siklik. Hal ini dilakukan dengan bantuan piston dan silinder seperti ditunjukkan gambar 2.

Pada umumnya, susunan piston dan silinder sebuah mesin ideal disusun oleh siklus dari proses-proses berikut:

1. Udara di silinder dipanaskan dengan bantuan sumber eksternal yang akan menaikkan temperatur dan tekanan udara tersebut.
2. Udara berekspansi karena tekanan dan temperatur yang lebih tinggi. Sebagai hasilnya, kerja dihasilkan oleh gas.
3. Udara kemudian membuang sebagian panas ke sumber eksternal. Kemudian udara kembali ke keadaan awal.
4. Udara kemudian di kompresi di dalam silinder. Untuk itu kerja dilakukan oleh udara.



Gambar 2. Mesin Ideal.

Istilah-istilah Penting pada Siklus Termodinamika

1. *Cylinder bore*

Diameter silinder, dimana piston bergerak, dikenal dengan istilah "cylinder bore".

2. *Panjang langkah*

Piston bergerak di dalam silinder karena rotasi engkol. Posisi paling atas disebut "titik mati atas" (TMA) dan posisi paling bawah disebut "titik mati bawah" (TMB). Jarak antara TMA dengan TMB disebut panjang langkah atau langkah/stroke.

3. *Volume Clearance*

Volume yang ditempati oleh fluida kerja, ketika piston mencapai titik mati atas disebut *volume clearance*. Biasanya ditulis dengan simbol (v_c).

4. *Volume Langkah*

Volume sapuan oleh piston ketika bergerak antara TMA dan TMB disebut volume sapuan, volume perpindahan atau volume langkah. Secara matematik volume sapuan:

$$\begin{aligned} v_s &= \text{luas penampang piston} \times \text{panjang langkah} \\ &= \frac{\pi}{4} \times d^2 \times l \end{aligned}$$

dimana, d = diameter piston

5. *Volume Silinder Penuh*

Volume yang ditempati oleh fluida kerja ketika piston berada pada titik mati bawah disebut volume silinder penuh. Secara volume silinder penuh sama dengan jumlah volume *clearance* ditambah dengan volume sapuan.

6. *Rasio Kompresi*

Perbandingan volume silinder penuh terhadap volume clearance disebut rasio kompresi. Secara matematis:

$$r = \frac{v_s + v_c}{v_c} = 1 + \frac{v_s}{v_c}$$

Catatan : Istilah ini juga disebut rasio ekspansi.

7. *Tekanan Efektif Rata-rata*

Pada kenyataannya, tekanan di dalam silinder berubah-ubah sesuai dengan posisi piston. Untuk memudahkan perhitungan, kita perlu tekanan efektif rata-rata, yang didefinisikan sebagai tekanan konstan yang bekerja pada piston selama langkah kerja, yang akan menghasilkan jumlah kerja yang sama, seperti yang dihasilkan oleh tekanan aktual yang bervariasi, yang dihasilkan selama siklus. Secara matematik, tekanan efektif rata-rata:

$$= \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{volume perpindahan}}$$

Efisiensi Siklus

Didefinisikan sebagai rasio kerja yang dilakukan terhadap kalor yang disuplai selama siklus. Secara matematik, efisiensi siklus:

$$\eta = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diberikan}}$$

Karena kerja yang dilakukan selama satu siklus adalah sama dengan kalor yang diberikan dikurangi dengan kalor yang dilepaskan, efisiensi siklus bisa juga dinyatakan:

$$\eta = \frac{\text{kalor yang diberikan} - \text{kalor yang dilepaskan}}{\text{kalor yang diberikan}}$$

- Catatan:**
1. Efisiensi, seperti yang diberikan di atas, adalah efisiensi teoritis siklus. Karena itu disebut juga efisiensi termal teoritis.
 2. Tidak memasukkan kerugian-kerugian yang ada pada keadaan sebenarnya ketika mesin sedang berjalan.
 3. Untuk membandingkan efisiensi termodinamik siklus, udara diasumsikan sebagai zat kerja di dalam silinder mesin. Selanjutnya, udara diasumsikan mempunyai sifat gas sempurna. Efisiensi yang diperoleh disebut juga sebagai *efisiensi standar udara*. Atau disebut juga *efisiensi ideal*.

Jenis-jenis Siklus Termodinamika

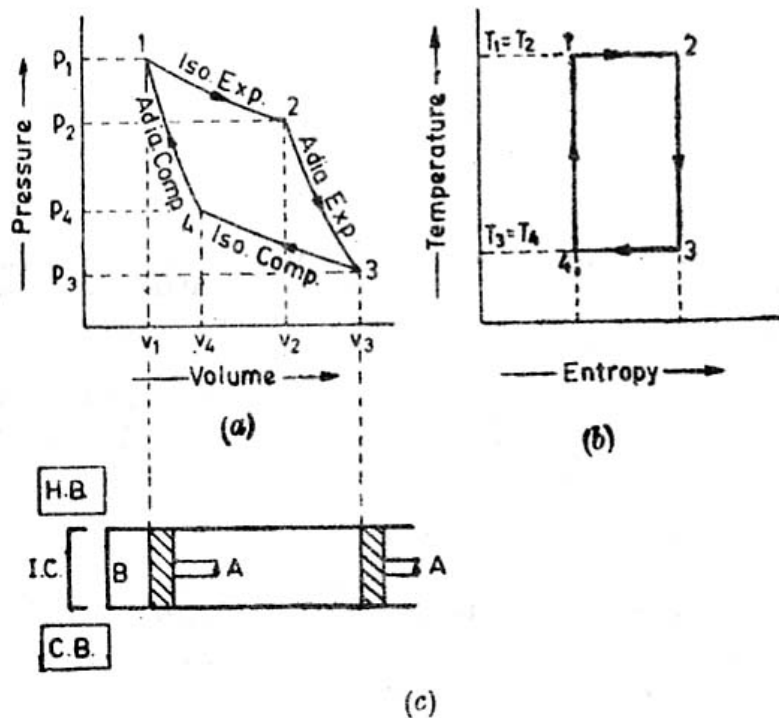
Ada banyak siklus termodinamika, namun siklus-siklus berikut termasuk siklus penting yang akan dibahas lebih lanjut.

1. Siklus Carnot.

2. Siklus Stirling.
3. Siklus Ericsson.
4. Siklus Joule.
5. Siklus Otto.
6. Siklus Diesel.
7. Siklus pembakaran dual.

Siklus Carnot

Siklus ini dibuat oleh Carnot, yang merupakan ilmuwan pertama yang menganalisis permasalahan efisiensi mesin kalor. Pada siklus Carnot, zat kerja melakukan operasi siklus yang terdiri dari dua operasi termal dan dua operasi adiabatik. Diagram $p-v$ dan $T-s$ dari siklus ditunjukkan gambar 3a dan b.



Gambar 3. Siklus Carnot.

(a). Diagram $p-v$. (b) Diagram $T-s$. (c) Piston dan silinder mesin.

Mesin yang dibayangkan oleh Carnot mempunyai udara (yang dianggap mempunyai sifat seperti gas sempurna) sebagai zat kerja yang berada di dalam silinder dimana terdapat piston A yang bergerak tanpa gesekan. Dinding silinder dan piston adalah non-konduktor, tetapi dasar silinder B adalah konduktor dan ditutup oleh penutup terisolasi IC . Mesin diasumsikan bekerja diantara dua sumber dengan kapasitas yang tak terbatas, satu pada temperatur tinggi dan yang lainnya pada temperatur rendah.

Sekarang kita lihat empat tingkat siklus Carnot. Misalkan mesin berisi m kg udara pada kondisi awal yang ditunjukkan oleh titik 1 pada diagram p - v dan T - s . Pada titik ini, p_1 adalah tekanan, T_1 adalah temperatur dan v_1 adalah volume udara.

Tingkat Pertama

Sumber dengan temperatur tinggi (hot body, $H.B$) dipasangkan ke dasar silinder B . Udara akan berekspansi pada temperatur konstan T_1 , dari v_1 ke v_2 . Artinya, temperatur T_2 sama dengan T_1 . Ekspansi isothermal ditunjukkan oleh kurva 1-2 pada diagram p - v dan T - s pada gambar 5.3 (a) dan (b). Perlu dicatat bahwa kalor yang diberikan semuanya diserap oleh udara, dan dimanfaatkan untuk menghasilkan kerja luar.

Kalor yang diberikan = Kerja yang dilakukan pada ekspansi isothermal

$$Q_1 = p_1 v_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = mRT_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \quad \dots (\because p_1 v_1 = mRT_1)$$

$$Q_1 = mRT_1 \ln r \quad \dots (\because r = \frac{v_2}{v_1} = \text{rasio ekspansi})$$

Tingkat kedua

Sumber panas diangkat dari dasar silinder B dan tutup IC tetap dipasang. Udara dibiarkan berekspansi secara adiabatik. Ekspansi adiabatik ditunjukkan oleh kurva 2-3 pada diagram p - v dan T - s . Temperatur udara turun dari T_2 ke T_3 . Karena tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan ke udara, maka penurunan energi dalam:

= kerja yang dilakukan oleh udara

$$= \frac{p_2 v_2 - p_3 v_3}{\gamma - 1} = \frac{mRT_2 - mRT_3}{\gamma - 1} \quad \dots (\because pv = mRT)$$

$$= \frac{mR(T_2 - T_3)}{\gamma - 1} \quad \dots (\because T_1 = T_2)$$

Tingkat ketiga

Sekarang angkat penutup IC dari dasar silinder dan pasang sumber dingin (cold body, CB). Udara dikompresi pada temperatur konstan T_3 dari v_3 ke v_4 . Artinya temperatur T_4 sama dengan T_3 . Kompresi isothermal ini ditunjukkan oleh kurva 3-4 pada diagram p - v dan T - s . Terlihat bahwa selama proses ini, kalor yang dilepaskan ke sumber dingin sama dengan kerja yang dilakukan udara.

∴ Kalor yang dilepaskan = kerja yang dilakukan udara

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= p_3 v_3 \ln \frac{v_3}{v_4} \\
 &= mRT_3 \ln \frac{v_3}{v_4} \quad \dots (\because pv = mRT) \\
 &= mRT_3 \ln r \quad \dots (\because r = \frac{v_3}{v_4} = \text{rasio kompresi})
 \end{aligned}$$

Catatan: rasio ekspansi dan kompresi harus sama, jika tidak siklus tidak akan tertutup.

Tingkat keempat

Sekarang pasang lagi penutup *IC* pada dasar silinder *B*, dan udara akan mengalami kompresi secara adiabatik. Kompresi adiabatik ditunjukkan oleh kurva 4-1 pada diagram *p-v* dan *T-s*. Temperatur udara naik dari T_4 ke T_1 . Karena tidak ada kalor yang diserap atau dilepaskan oleh udara sehingga:

Kenaikan energi dalam = kerja yang dilakukan udara

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= \frac{p_1 v_1 - p_4 v_4}{\gamma - 1} = \frac{mRT_1 - mRT_4}{\gamma - 1} \quad \dots (\because pv = mRT) \\
 &= \frac{mR(T_1 - T_3)}{\gamma - 1} \quad \dots (\because T_3 = T_4)
 \end{aligned}$$

Kita lihat dari penjelasan di atas bahwa penurunan energi dalam selama ekspansi adiabatik 2-3 sama dengan kenaikan energi dalam selama kompresi adiabatik 4-1. Karena itu efek netto keseluruhan siklus adalah nol. Kita tahu bahwa:

Kerja yang dilakukan = Kalor yang diberikan – Kalor yang dilepaskan

$$\begin{aligned}
 &= mRT_1 \ln r - mRT_2 \ln r \\
 &= mR \ln r (T_1 - T_2)
 \end{aligned}$$

dan efisiensi:

$$\eta = \frac{\text{kerja yang dilakukan}}{\text{kalor yang diberikan}} = \frac{mR \ln r (T_1 - T_2)}{mRT_1 \ln r}$$

$$= \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1}$$

Dari kompresi adiabatik:

$$\frac{T_3}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1}$$

... (dimana $\frac{v_3}{v_2} = r =$ rasio kompresi adiabatik)

$$\therefore \eta = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1}$$

Catatan:

1. Dari persamaan di atas, terlihat bahwa efisiensi siklus Carnot naik dengan naiknya T_1 atau turunnya T_3 . Dengan kata lain, kalor harus diambil dari temperatur yang setinggi mungkin dan dilepaskan ke temperatur yang serendah mungkin. Perlu dicatat bahwa efisiensi 100% hanya bisa dicapai hanya jika T_3 mencapai 0 mutlak, namun adalah tidak mungkin mencapai ini di dalam kondisi sebenarnya.
2. Perlu diketahui bahwa adalah tidak mungkin membuat mesin bekerja dengan siklus Carnot. Alasan sederhana untuk ini adalah bahwa ekspansi isothermal 1-2 harus dilakukan secepat mungkin supaya udara selalu mempunyai temperatur T_1 . Serupa dengan ini, kompresi isothermal 3-4 juga harus dilakukan dengan sangat lambat. Tetapi ekspansi adiabatik 2-3 dan kompresi 4-1 harus dilakukan secepat mungkin supaya tercapai kondisi adiabatik yang ideal. Namun pada keadaan nyata, perubahan kecepatan mesin yang drastis adalah tidak mungkin. Lebih jauh, adalah tidak mungkin secara sempurna menghilangkan gesekan antara komponen-komponen yang bergerak pada mesin dan juga menghilangkan kerugian-kerugian kalor karena konduksi, radiasi dan sebagainya. Jadi jelas bahwa adalah tidak mungkin untuk merealisasikan mesin Carnot ini. Namun bagaimanapun, mesin imajiner ini tetap digunakan sebagai pembanding untuk mesin-mesin kalor lainnya.